

## Optischer Neigungsmesser

Die Erfindung betrifft einen optischen Neigungsmesser nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1, ein Verfahren zur Messung  
5 der Neigung eines Gerätes nach dem Oberbegriff des Anspruchs 13 sowie ein geodätisches Gerät mit einem solchen Neigungsmesser, ein Verfahren zur Kompensation von Vibrationen und/oder statistischen Fluktuationen und einen Wellenfrontsensor zur Verwendung in einem optischen  
10 Neigungsmesser nach dem Oberbegriff des Anspruchs 20.

Neigungsmesser verschiedener Bauarten finden seit langer Zeit Anwendung in allen Bereichen, in denen die Lage eines Gerätes berücksichtigt werden muss. Dies gilt insbesondere  
15 für Messungen im geodätischen Bereich oder im Bauwesen.

Allgemein werden gattungsgemässe optische Neigungsmesser des Stands der Technik realisiert, indem eine Flüssigkeitsoberfläche in der Pupille eines optischen  
20 Subsystems positioniert wird. Durch diese Flüssigkeit als Medium wird eine Phasenverschiebung einer von einer Strahlungsquelle einfallenden Strahlung bewirkt, wobei die Wechselwirkung von Strahlung und Medium in Reflexion oder Transmission erfolgen kann und folgende Beziehungen gelten:

25

in Reflexion:  $\Phi = 2 \cdot P(x)$  (1)

in Transmission:  $\Phi = (n-1) \cdot P(x)$  (2)

30 Die Grösse  $\Phi$  bezeichnet die Phasenverschiebung,  $n$  den Brechungsindex der Flüssigkeit und  $P(x)$  die Formfunktion der Flüssigkeitsoberfläche, wobei diese gemäss

$$P(x) = 2\pi / \lambda \cdot x \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

definiert ist und  $\lambda$  die Wellenlänge der einfallenden Strahlung,  $x$  die laterale Pupillencoordinate und  $\alpha$  den  
5 Neigungswinkel bezüglich einer Bezugsgeraden bezeichnen.

Aus der apparativ gemessenen Phasenverschiebung  $\Phi$  kann nun  
gemäss Gleichung (3) auf den Winkel der  
Flüssigkeitsoberfläche gegenüber der Bezugsgeraden  
10 geschlossen werden.

In den Patentschriften DE 196 10 941 C2 und DE 198 19 610  
C1 werden gattungsgemässe optische Neigungsmesser  
beschrieben, bei denen die Richtungsänderung eines  
15 Lichtstrahls durch Reflexion an einer neigungsabhängigen  
Oberfläche einer Flüssigkeit erfolgt. Dabei wird eine  
Struktur auf ein- oder zweidimensionale Sensorelemente  
abgebildet. Aus der Veränderung der Lage des Abbildes  
dieser Struktur wird auf die Neigung geschlossen.

20

Aus der Offenlegungsschrift DE 41 10 858 ist ein  
zweiachsiger Neigungsmesser bekannt, bei dem eine  
geometrische Figur über einen neigungsempfindlichen und  
strahlableitenden Sensor auf ein Lineararray projiziert  
25 wird. Der Sensor beinhaltet eine Flüssigkeit, deren Lage  
relativ zum Gerät zu einer Beeinflussung bzw. Ablenkung der  
Projektion der Figur auf dem Lineararray führt.

Die internationale PCT-Patentanmeldung Nr. PCT/EP03/05206  
30 beschreibt einen optischen Neigungsmesser, bei dem eine  
Grenzschicht zwischen zwei Medien auf eine Kamera  
abgebildet wird. Aus den Parametern dieser Grenzschicht,  
wie z.B. deren Lage und Form, wird die Neigung eines mit

einem solchen Neigungsmesser ausgestatteten Gerätes abgeleitet.

In diesen gattungsgemässen Neigungsmessern werden  
5 Flüssigkeiten verwendet, bei denen die neigungsabhängige  
Lage der Flüssigkeitsoberfläche zur Ableitung des  
Neigungswinkels mittelbar oder unmittelbar herangezogen  
wird. Als Nachteil stellt sich jedoch heraus, dass die  
Verwendung einer Flüssigkeitsoberfläche mit einer Vielzahl  
10 von Problemen behaftet ist, die vor allem in den  
dynamischen Eigenschaften der Flüssigkeit begründet sind.  
So werden beispielsweise durch Vibrationen oder durch  
Konvektion Abweichungen der Oberfläche von einer idealen  
Ebene bewirkt, die zu einer entsprechenden Beeinflussung  
15 der reflektierten oder transmittierten Strahlung führen.

Durch diese Einflüsse treten verschiedene Störungen der  
Wellenfront auf. Eine statistische Unebenheit der  
Flüssigkeitsoberfläche führt zu einem ortsabhängig  
20 variierenden Winkel der Oberfläche, der die Annahme eines  
für die gesamte Flüssigkeitsoberfläche gleichen  
Neigungswinkels  $\alpha$  nicht mehr zulässt. Darüber hinaus  
treten bei Beschleunigungen des Mediums oder beim Auftreten  
von thermischen Gradienten Deformationen der Oberfläche  
25 auf, die sich grundsätzlich als asphärische Aberrationen  
höherer Ordnung modellieren lassen, bisher aber nicht  
berücksichtigt werden. Durch eine so gestörte Oberfläche  
wird das Abbild einer Struktur auf einem Sensor verzerrt,  
unscharf oder der Kontrast herabgesetzt, so dass die  
30 Messung mit Schwierigkeiten behaftet ist.

Bisherige Ansätze zur Kompensation betreffen beispielsweise  
handhabungstechnische Massnahmen zur direkten Verringerung

der Effekte, wie z.B. die Einführung von Totzeiten, in denen sich ein Neigungsmesser nach Inbetriebnahme aufwärmt, oder geräteseitige Auslegungen, wie z.B. eine hinreichend grosse Dimensionierung der Flüssigkeitsbehälter. Ausserdem  
5 kann der mögliche Einsatzbereich eines Neigungsmessers beschränkt werden, z.B. hinsichtlich der zulässigen Vibration oder Beschleunigung.

Die Aufgaben der vorliegenden Erfindung bestehen allgemein  
10 in der Verbesserung eines gattungsgemässen optischen Neigungsmessers.

Insbesondere besteht eine Aufgabe in der Bereitstellung eines Neigungsmessers, der eine verbesserte Messgenauigkeit  
15 aufweist.

Weitere Aufgaben bestehen in der weitergehenden Miniaturisierbarkeit eines gattungsgemässen Neigungsmessers und in der Vereinfachung seines Aufbaus.  
20

Eine weitere Aufgabe besteht in der Bereitstellung eines Neigungsmessers, bei dem zeitliche Nutzungsbeschränkungen, insbesondere aufgrund thermischer Effekte, reduziert oder vermieden sind.  
25

Eine weitere Aufgabe besteht darin, einen Neigungsmesser bereitzustellen, der einen gegenüber dem Stand der Technik erweiterten Anwendungsbereich besitzt, insbesondere hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung durch  
30 Vibrationen.

Eine weitere Aufgabe besteht in der Bereitstellung eines Verfahrens, das eine algorithmische oder elektronische

Berücksichtigung von Störungen einer Wellenfront in einem Neigungsmesser erlaubt.

5 Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, eine bauliche Integrierbarkeit in geodätische oder bautechnische Geräte zu gewährleisten. Dies betrifft insbesondere die Nutzung bereits vorhandener elektronischer Komponenten als Auswerteeinrichtungen.

10 Eine weitere Aufgabe besteht in der Bereitstellung eines Wellenfrontensors für einen Neigungsmesser, der eine Messung in einem vergrösserten Winkelbereich erlaubt und/oder eine erhöhte Auflösung und/oder einen erhöhten Dynamikbereich aufweist.

15

Diese Aufgaben werden erfindungsgemäss durch kennzeichnende Merkmale der Ansprüche 1, 13 bzw. 20 oder durch kennzeichnende Merkmale der Unteransprüche gelöst.

20 Die vorliegende Erfindung betrifft einen optischen Neigungsmesser. Durch eine Strahlungsquelle wird Strahlung erzeugt, mit der eine Wellenfront über ein Medium, dessen Lage neigungsabhängig ist, auf einen Detektor abgebildet wird, wobei dieser Detektor als ein- oder mehrdimensionale,  
25 insbesondere flächige Kamera ausgebildet werden kann. Das Medium wird durch einen Behälter aufgenommen. Dieser Behälter kann beispielsweise aus einer Dose zur Aufnahme einer Flüssigkeit bestehen. Die Abbildung muss dabei nicht einer Abbildung im optisch exakten Sinne entsprechen.  
30 Wesentlich ist die Durchleuchtung des Behälters mit wenigstens einem darin befindlichen oder von diesem gehaltenen ersten Medium oder die Reflexion der Strahlung an einer Oberfläche bzw. Grenzschicht dieses Mediums, nach

der eine Detektion der Wellenfront so erfolgt, dass aus dieser auf eine Neigung geschlossen werden kann.

Die Struktur kann der Strahlung extern aufgeprägt werden, z.B. durch eine Blende oder einen Transmissions- bzw. Reflexionscode, oder aber auch aus einer der Strahlung inhärenten Struktur bestehen. Wesentlich ist eine Struktur des Strahlungsfeldes, die nach Wechselwirkung mit dem neigungsabhängigen Medium so in ihrer Abbildung auf dem Detektor verändert ist, dass aus dieser Veränderung ein Rückschluss auf die Lage des Mediums erfolgen kann. Die Neigung wird dabei bezüglich einer Bezugsgerade bestimmt, die als Referenz dient und die im Regelfall mit einer Bezugsgrösse eines Gerätes, z.B. einer Strichplatte oder einer Ausrichtkante, zusammenfällt.

Die verwendete Strahlung kann im sichtbaren aber auch im nicht sichtbaren Spektralbereich liegen und wird im Regelfall durch die technischen und physikalischen Parameter von Strahlungsquelle, Detektor und Medium bestimmt. Als Strahlungsquelle können neben herkömmlichen Lampen verschiedenen Typs auch lichtemittierende Dioden oder Laser, insbesondere Halbleiterlaser, verwendet werden, wobei eine geräteseitig vorteilhafte Führung der Strahlung durch optische Elemente, wie z.B. Lichtleiter, erfolgen kann. Je nach Realisierungsform wird mit dieser Strahlung das Medium durchleuchtet oder aber das Medium dient Reflexion der Strahlung.

Beispiele für als Medium geeignete Flüssigkeiten stellen Quecksilber, Wasser oder Siliconöl dar. Für die Feststellung der Lage des Mediums kann sowohl die Reflexion

an einer Grenzschicht als auch ein Durchgang durch das Medium oder eine Kombination aus beidem verwendet werden.

Das Bild der Struktur wird nach dieser Reflexion und/oder  
5 Transmission auf die Kamera projiziert und dort aufgenommen  
und in elektronische Signale umgewandelt. Als eine  
geeignete Kamera kann beispielsweise eine CCD-Kamera oder  
eine CMOS-Kamera dienen. Eine solche Kamera ist  
beispielsweise als CMOS-Monochrom-Bildsensor ADCS 2120 der  
10 Firma Agilent erhältlich, die über ein Feld aus 640 x 480  
Pixelpunkten verfügt.

Die von der Kamera erzeugten Signale werden von einer  
Auswerteeinheit analysiert und hinsichtlich der Neigung des  
15 Gerätes ausgewertet. Hierfür kann ein eigener Baustein bzw.  
eine eigene Komponente verwendet werden. Alternativ kann  
aber auch auf eventuell vorhandene Komponenten anderer  
Geräte zurückgegriffen werden. Beispielsweise kann die  
Funktion dieser Auswerteeinheit bei einem in einen  
20 Entfernungsmesser eingebauten Neigungsmesser auch von der  
für die Entfernungsmessung verwendeten Elektronik  
mitübernommen werden. Gleichermassen ist es möglich als  
Strahlungsquelle auch bereits für andere Zwecke verwendete  
Quellen zu verwenden. So kann im Beispiel des  
25 Entfernungsmessers ein Teil des dort ggf. zur  
Distanzmessung verwendeten Laserlichtes ausgekoppelt und,  
eventuell nach einer Streuung oder Strahlaufweitung, zur  
Abbildung verwendet werden.

30 Erfindungsgemäss werden störende Einflüsse der  
Wechselwirkung des Strahlungsfeldes mit dem Medium durch  
eine Analyse von Informationen über die Wellenfront der  
Strahlung berücksichtigt und so der Einfluss einer

gestörten Flüssigkeitsoberfläche kompensiert. Dabei stehen verschiedene geeignete Ansätze zur algorithmischen oder schaltungstechnischen Umsetzung zur Verfügung.

- 5 Die Beleuchtung der Struktur erfolgt vorteilhafterweise mit einer ebenen oder leicht sphärischen Welle, die aber nach der Wechselwirkung mit dem Medium Aberrationen aufweisen kann, die z.B. durch Unebenheiten der Oberfläche des Mediums aber auch durch Inhomogenitäten im Inneren des
- 10 Mediums, wie sie beispielsweise durch Konvektion erzeugt werden, hervorgerufen werden können. Diese Störungen der Oberfläche bzw. des Inneren des Mediums treten beispielsweise durch Temperaturgradienten während der Einschaltphase des Gerätes auf oder werden durch externe
- 15 Einflüsse, wie z.B. Vibrationen, aufgeprägt. Um diese Einflüsse in einem tolerierbaren Bereich zu halten, werden bei Neigungsmessern des Stands der Technik die Behälterabmessungen hinreichend gross gewählt, so dass eine Miniaturisierung bisher an Grenzen stösst. Eine ergänzende
- 20 oder alternative Massnahme besteht in der Inkaufnahme von Totzeiten des Neigungsmessers, während derer ein Einschwing- bzw. Ausgleichsvorgang stattfindet und die Messgenauigkeit eingeschränkt ist.
- 25 Ein erfindungsgemässer Neigungsmesser verwendet einen Detektor, der als Wellenfrontsensor ausgebildet ist bzw. einen Wellenfrontsensor aufweist, zur Ableitung von Informationen über die Wellenfront. Detektor bzw. Wellenfrontsensor können vorteilhaft direkt nach dem Medium
- 30 angeordnet werden. Um weitere Beeinträchtigungen der Abbildungsqualität zu vermeiden, ist es darüber hinaus vorteilhaft, beim Durchstrahlen des Mediums den Strahlgang zu wählen, das er senkrecht zur Oberfläche des Mediums



geführt wird und nach Verlassen des Mediums direkt auf den Wellenfrontsensor trifft.

Ein Beispiel für einen geeigneten Wellenfrontsensor stellt  
5 ein Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor (SHS) dar, obwohl  
erfindungsgemäss grundsätzlich auch andere Typen von  
Sensoren verwendet werden können. Ein Shack-Hartmann-  
Wellenfrontsensor weist ein Mikrolinsenarray auf, durch das  
eine Vielzahl von Subaperturen gebildet wird. Diese  
10 Mikrolinsen können dabei sowohl rein zeilenartig und damit  
linear als auch in Form einer Matrix und damit flächenhaft  
angeordnet sein. Durch eine geeignete Wahl der Brennweiten  
des Mikrolinsenarrays lässt sich eine ausreichend hohe  
Winkelauflösung einstellen. Bei hinreichender Kenntnis der  
15 Wellenfront können störende Aberrationen der Wellenfront  
wegkalibriert werden. Meist werden die Linsen äquidistant  
in einer zweidimensionalen lateralen Anordnung verwendet,  
wobei eine Matrix von Fokalfpunkten erzeugt wird. Die  
Verschiebung jedes Fokalfunktes von der Achse der Linse ist  
20 ein Mass für die Verkipfung der Wellenfront innerhalb der  
Apertur dieser Linse. Mit geeigneten Algorithmen kann aus  
der Summe der Fokalfunkte die gesamte Wellenfront  
näherungsweise rekonstruiert werden. Dabei kann durch die  
Abtastung der Wellenfront mit den vielen Subaperturen eine  
25 weitgehende oder vollständige Rekonstruktion der  
Topographie der Oberfläche bzw. der Wellenfront erfolgen  
oder aber nur ein Teil der Information, z.B. zur Auswahl  
von Bildpunkten des Detektors mit nicht gestörter  
Abbildung, verwendet werden.

30

Zur Detektion der Lage der Fokalfunkte können CCD- oder  
CMOS-Sensoren verwendet werden, wobei für jede Subapertur  
ein Array aus mindestens 2X2-Pixeln zum Einsatz kommt. In

dieser Auslegung entspricht dies einem Quadrantensensor. Je nach Auflösungserfordernis können jedoch auch grössere Zahlen von Pixeln pro Subapertur verwendet werden. Zur Steigerung der Auslesegeschwindigkeit und zur Verringerung des Rauschens ist eine Zusammenfassung zu Überstrukturen von Pixeln realisierbar. Gleichfalls ist auch eine Verwendung von rein linearen, zeilenartigen Wellenfrontsensoren geeignet.

- 10 Durch die Verwendung eines Wellenfrontsensors kann auch der apparative Aufwand verringert werden, da keine 4f-Optik verwendet werden muss und die Mikrolinsenarrays einfach und preiswert durch Replikaverfahren hergestellt werden können.
- 15 Durch den Wellenfrontsensor werden Informationen über Parameter bzw. die Gestalt der Wellenfront bereitgestellt, die algorithmisch oder schaltungstechnisch zu einer Kompensation der Aberrationen verwendet werden können. Zum einen kann die Wellenfront hinsichtlich ihrer Formfunktion
- 20 vollständig oder teilweise analysiert werden. Im allgemeinen kann eine Wellenfront  $W(x,y)$  durch eine Summe Polynome höherer Ordnung approximiert werden. Eine mögliche Ableitung ist beispielsweise mit Hilfe von Zernike-Polynomen möglich. Dabei wird eine Wellenfront  $W(x,y)$  als
- 25 Summe

$$W(x,y) = \sum_0^{\infty} C_n Z_n(x,y) \quad (4)$$

mit den Koeffizienten  $C_n$  dargestellt, wobei die ersten zehn

30 Polynome  $Z_n(x,y)$  in kartesischen Koordinaten wie folgt definiert werden können

$$\begin{aligned}Z_1(x, y) &= y \\Z_2(x, y) &= x \\Z_3(x, y) &= -x^2 + y^2 \\Z_4(x, y) &= 2xy \\Z_5(x, y) &= -1 + 2x^2 + 2y^2 \\Z_6(x, y) &= -3x^2y + y^3 \\Z_7(x, y) &= -x^3 + 3xy^2 \\Z_8(x, y) &= -2y + 3x^2y + 3y^3 \\Z_9(x, y) &= -2x + 3x^3 + 3xy^2 \\Z_{10}(x, y) &= x^4 - 6x^2y^2 + y^4\end{aligned}\tag{5}$$

Hierbei können speziellen optischen Fehlern auch entsprechenden Koeffizienten zuordnen, wie z.B.  $Z_5$  hinsichtlich des Astigmatismus.

Neben der Rekonstruktion der Wellenfront kann auch eine reine Erkennung von Pixeln erfolgen, deren zugeordnete Apertur einen ebenen Abschnitt bzw. einen Anteil der Wellenfront ohne Verkipfung bzw. Störung erfasst. Damit kann bewirkt werden, dass nur der Inhalt von solchen Pixeln für eine Auswertung verwendet wird und die Störungen bereits sehr nahe an der Hardware eliminiert werden.

Darüber hinaus können auch die lokalen Informationen über den Verlauf der Wellenfront korreliert werden. Hierfür stehen geeignete Algorithmen, z.B. zur Wavelet-Transformation, zur Verfügung, die beispielsweise eine Reduzierung des Rauschens erlauben.

20

Zur Erhöhung der Leistungseigenschaften eines erfindungsgemässen optischen Neigungsmessers kann ein erfindungsgemässer Wellenfrontsensor verwendet werden. Bei diesem erfindungsgemässen Wellenfrontsensor wird dessen Auflösung und Absolutbestimmung der Wellenfront durch

25

5 eindeutige Zuordnung der Wellenfrontabschnitte erhöht. Wellenfrontsensoren nach dem Shack-Hartmann-Prinzip des  
10 Stands der Technik verwenden nur die Positionsbestimmung des Fokalpunktes innerhalb der jeweiligen Subapertur. Die  
Auflösung ist somit von der Brennweite der einzelnen Mikrolinse und der Anzahl von Mikrolinsen sowie der jeweils  
einer Mikrolinse zugeordneten Bildpunkte begrenzt. Des  
weiteren ist ohne Modifizierung der Mikrolinsenarrays wegen  
der Dark Spots keine absolute Bestimmung der Wellenfront  
15 möglich. Bei dem erfindungsgemässen Wellenfrontsensor wird  
vor den Mikrolinsen ein diffraktives Element eingebracht,  
durch das bewirkt wird, dass anstelle eines Fokalpunktes in  
der Subapertur mehrere Fokalpunkte der erzeugten  
Beugungsordnungen oder auch ganze Beugungsbilder zur  
20 Bestimmung der exakten Wellenfront herangezogen werden.  
Dabei kann ausgenutzt werden, dass neben den einer  
Mikrolinse jeweils zugeordneten Bildpunkten auch weitere  
Bildpunkte des Detektors ausgeleuchtet werden. Eine  
Trennung und Zuordnung der Beleuchtungsstrukturen zu den  
25 jeweiligen Subaperturen ist auf algorithmischem Weg mit an  
sich bekannten Verfahren realisierbar. Vorteilhaft ist eine  
gut unterscheidbare Ausgestaltung der Beugungsstrukturen,  
wie sie beispielsweise durch grosse Intensitätsänderungen,  
z.B. wie bei einem Barcode, realisiert werden können, wobei  
auch zur Code-Rekonstruktion besonders geeignete  
Eigenschaften, wie z.B. die Verwendung einer M-Sequenz,  
erfindungsgemäss berücksichtigt werden können.

30 Durch das erfindungsgemässe Verfahren bzw. die  
erfindungsgemässe Vorrichtung kann die Einschwingphase nach  
Einschalten des Gerätes verkürzt werden. Auch ist es  
möglich, die Abmessungen des Behälters für das Medium zu

verkleinern, so dass eine weitere Miniaturisierbarkeit des Neigungsmessers besteht.

Das erfindungsgemässe Verfahren bzw. eine erfindungsgemässe Vorrichtungen werden nachfolgend anhand von in der Zeichnung schematisch dargestellten Ausführungsbeispielen rein beispielhaft näher beschrieben. Im einzelnen zeigen

10 Fig.1a-b die schematische Darstellung eines Neigungsmessers mit Reflexion nach dem Stand der Technik;

15 Fig.2 die schematische Darstellung eines Neigungsmessers mit Transmission nach dem Stand der Technik;

20 Fig.3a-b die schematische Darstellung der erfindungsgemässen Anordnung und Wirkung eines Wellenfrontsensors;

Fig.4 die schematische Darstellung der erfindungsgemässen Nutzung eines Wellenfrontsensors;

25 Fig.5 die schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemässen Neigungsmessers in Seitenansicht;

30 Fig.6 die schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemässen Neigungsmessers in Seitenansicht;

Fig.7a-b die schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform eines erfindungsgemässen Neigungsmessers in Seiten- und Draufsicht;

5 Fig.8 eine schematische Darstellung einer Form des erfindungsgemässen Verfahrens; und

Fig.9 die schematische Darstellung eines erfindungsgemässen Wellenfrontsensors.

10

In Fig.1a-b wird ein Neigungsmesser nach dem Stand der Technik beschrieben, der nach dem Prinzip der Reflexion arbeitet. Fig.1a zeigt die Bedingungen bei einer horizontalen Ausrichtung des Neigungsmessers wohingegen

15 Fig.1b die Bedingungen bei einer leichten Neigung erläutert. In Fig.1a fällt von einer Strahlungsquelle emittierte Strahlung S auf einen Strichcode als abzubildende Struktur 1 und wird in einen Prismenkörper 2 geführt, dort an einer Innenfläche reflektiert und auf eine  
20 auf der Oberfläche des Prismenkörpers 2 befindliche Flüssigkeitsschicht 4 gelenkt. An der dem Prismenkörper 2 abgewandten Oberfläche der Flüssigkeitsschicht 4 erfolgt eine weitere Reflexion und eine nachfolgende Abbildung auf einen Detektor 3, der hier beispielhaft als Lineararray  
25 ausgebildet ist. Die Struktur 1 wird dabei auf dem Detektor 3 als ein Bild B abgebildet. Die Lage des Bildes B ist dabei abhängig von dem Winkel der dem Prismenkörper 2 abgewandten Oberfläche der Flüssigkeitsschicht 4 gegenüber dem Prismenkörper 2.

30

In Fig.1b wird eine zu Fig.1a ähnliche Situation dargestellt, bei der die Flüssigkeitsschicht 4 durch die Neigung einen keilförmigen Querschnitt erhält. Hierdurch

verlaufen die dem Prismenkörper 2 zu- und abgewandten Oberflächen der Flüssigkeitsschicht 4 nicht mehr parallel sondern befinden sich in einem Winkel zueinander. Die an der Innenfläche des Prismenkörpers reflektierte Strahlung S trifft nun auf eine gegenüber Fig.1a anders geneigte Oberfläche der Flüssigkeitsschicht 4 und wird somit unter einem anderen Winkel auf den Detektor 3 projiziert. Damit verschiebt sich auch das Bild B des Strichcodes als Struktur 1. Aus dem ausmass der Verschiebung des Bildes B kann auf die Neigung geschlossen werden.

Fig.2 stellt einen Neigungsmesser mit Transmission nach dem Stand der Technik schematisch dar. Ein Strichcode wird als Struktur 1 über ein optisches System mit wenigstens einer kollimierenden Linse 5' durch ein Medium 6 geführt und über ein optisches System mit wenigstens einer fokussierenden Linse 5'' auf einen hier nicht explizit dargestellten Detektor abgebildet. Die nach dem Durchgang durch den transmittiven Strichcode noch ebene oder leicht sphärische, aber ungestörte Wellenfront WF1 erfährt durch Unebenheiten der Oberfläche oder Inhomogenitäten innerhalb des gestörten Mediums 6 eine Veränderung ihrer Form, so dass eine gestörte Wellenfront WF2 resultiert. Diese Veränderung der ungestörten Wellenfront WF1 hin zur gestörten Wellenfront WF2 führt zu einem ebenfalls gestörten Bild B' auf dem Detektor. Beispielsweise kann durch diese Einflüsse der Kontrast der Struktur 1 herabgesetzt sein, so dass eine Unterscheidung einzelner Merkmale der Struktur 1 erschwert bzw. verschlechtert ist.

Die erfindungsgemässe Anordnung und Wirkung eines Wellenfrontsensors wird in Fig.3a-b schematisch erläutert,

wobei Fig.3a die Situation mit einem ungestörten Medium 6' und Fig.3b mit einem gestörten Medium 6 veranschaulicht.

5 In Fig.3a fällt die Strahlung auf ein ungestörtes Medium 6' und durchquert dieses, wobei der Durchgang zur Verminderung von Verlusten und Aberrationen im wesentlichen senkrecht zur Oberfläche erfolgt. Nach dem Durchgang ist die Wellenfront WF3 ungestört und im wesentlichen eben. Beim Auftreffen der Strahlung auf den Wellenfrontsensor, der 10 eine Vielzahl von Mikrolinsen 7 mit zugeordneten Subaperturen aufweist, wird die Strahlung einer jeden Subapertur auf eine Kamera 8 abgebildet. Da die Wellenfront WF3 einen ebenen Verlauf aufweist, besitzt sie überall den gleichen parallelen Verlauf und damit identischen Winkel 15 gegenüber dem Wellenfrontsensor, so dass die Fokalfpunkte FP auf der Kamera 8 äquidistant und auf der optischen Achse einer jeden Mikrolinse 7 abgebildet werden.

Fig.3b zeigt die Situation für eine gestörte Wellenfront 20 WF4, die nach dem Durchgang durch das gestörte Medium 6 Aberrationen und damit einen nicht mehr ebenen Verlauf aufweist. Die Mikrolinsen 7 projizieren wiederum die von ihrer jeweiligen Subapertur erfasste Strahlung auf den Detektor 8. Da nun für jede dieser Subaperturen der Winkel 25 des erfassten Wellenfrontabschnittes lokal differiert, besitzen auch die zugehörigen Fokalfpunkte FP unterschiedliche Abstände. Bei den Subaperturen, die einen nicht parallelen Wellenfrontabschnitt erfassen, fallen Fokalfpunkt FP und optische Achse nicht mehr zusammen, so 30 dass eine Abweichung resultiert. Da der einer Subapertur zugeordnete Bereich der Kamera 8 mehrere Pixel aufweist, kann die Lage des Fokalfpunktes FP aufgelöst werden und



damit auf den Winkel des Wellenfrontabschnitts geschlossen werden.

Diese Verhältnisse werden in Fig.4 nochmals verdeutlicht und die für eine erfindungsgemässe Nutzung ableitbaren Grössen schematisch dargestellt. Der von den Subaperturen der einzelnen Mikrolinsen 7 erfasste Wellenfrontabschnitt wird auf die Kamera 8 abgebildet, wobei je nach konkretem Verlauf Fokalfpunkt FP und optische Achse OA zusammen oder auseinanderfallen können. Beispielsweise lässt ein (in diesem Beispiel) links von der optischen Achse OA gelegener Fokalfpunkt FP auf eine von rechts einfallende Strahlung schliessen, so eine entsprechende Neigung des jeweiligen Wellenfrontabschnittes abgeleitet werden kann. Das Ausmass des Auseinanderfallens von Fokalfpunkt FP und optischer Achse OA stellt dabei eine Funktion des Winkels des Wellenfrontabschnittes dar.

Fig.5 zeigt eine erste Ausführungsform eines erfindungsgemässen optischen Neigungsmessers. Durch die in einem Lichtleiter als lokaler Strahlungsquelle 11 geführte Strahlung S wird eine schräge, reflektierende Fläche des Gehäuses eines erfindungsgemässen Neigungsmessers beleuchtet. Der Detektor 3' weist einen Wellenfrontsensor mit einer Kamera 8' und einem vorgeschalteten Array aus Mikrolinsen 7 auf. Auf der dem Strahlungseinfall entgegengesetzten Seite der Kamera 8' ist eine Auswerteeinheit 9' positioniert. Durch eine solche Anordnung der Komponenten ist eine besonders flache Bauweise des Neigungsmessers realisierbar.

In Fig.6 erfolgt die schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemässen optischen

Neigungsmessers mit der Integration aller Komponenten auf einer Platte als gemeinsamer Basis 12 in Seitenansicht. Durch eine Strahlungsquelle 11' wird sichtbare oder nicht sichtbare Strahlung S senkrecht zur Basis 12 emittiert. Die Strahlung S wird durch eine Linse 5''' kollimiert und über ein erstes Umlenkelement 13' und ein zweites Umlenkelement 13'' wieder so umgelenkt, dass sie senkrecht zur Basis 1 einfällt. Im Bereich der einfallenden Strahlung ist auf der Basis 1 ein Behälter für das Medium 6' mit einer zur Basis orientierten ersten Oberfläche und einer zum zweiten Umlenkelement 13'' orientierten zweiten Oberfläche angebracht. Zwischen Basis 12 und dem Behälter bzw. dessen erster Oberfläche befindet sich ein Detektor 3'' mit einem Wellenfrontsensor aus einer Kamera 8'' und einem vorgeschalteten Array von Mikrolinsen 7. Der Detektor 3'' ist mit einer Auswerteeinheit 9'' verbunden. Aus Gründen der Platzersparnis sind die zur Strahlerzeugung, zum Strahlengang und zum Strahlungsempfang gehörigen Komponenten auf der einen Seite der Basis 12, die Auswerteeinheit 9'' aber auf der entgegengesetzten Seite der Basis 12 angebracht, grundsätzlich kann jedoch auch eine andere Anordnung der Komponenten oder der Auswerteeinheit 9'' gewählt werden. Diese Anordnung bietet somit den Vorteil der Integration aller elektronischen Bauteile auf einer gemeinsamen Basis 12, die beispielsweise auch als Leiterplatte ausgebildet sein kann. Hierdurch kann ein einfacher und mechanisch unempfindlicher Aufbau realisiert werden. Die Umlenkelemente 13' und 13'' können als reflektierende Bauelemente, z.B. als Prismen oder Spiegel ausgebildet sein. Grundsätzlich kann bei Verzicht der Montage auf eine gemeinsame Basis 12 jedoch auch eine direkte Montage der Komponenten aufeinander erfolgen, wie

dies in einer zweiten erfindungsgemässen Ausführungsform in Fig.5 oder Fig.7a-b dargestellt wird.

Fig.7a-b zeigt eine dritte Ausführungsform eines  
5 erfindungsgemässen optischen Neigungsmessers mit koaxialer  
Anordnung aller Komponenten. Die Basis 12' ist im  
wesentlichen u-förmig ausgebildet und nimmt zwischen den  
beiden Schenkeln eine Strahlungsquelle 11'' auf. Die  
Strahlungsquelle emittiert Strahlung S, die von einer Linse  
10 5''' kollimiert wird. Die kollimierte Strahlung S wird  
danach durch das Medium 6' geführt, das in einem Behälter  
mittelbar oder unmittelbar auf dem Detektor 3''' angebracht  
ist, der einen Wellenfrontsensor mit einer Kamera 8''' und  
flächig angeordneten Mikrolinsen 7 aufweist. Auf der dem  
15 Detektor 3''' entgegengesetzten Seite der Basis 12' ist  
eine Auswerteeinheit 9''' angebracht.

Fig.7b zeigt eine Draufsicht auf die Anordnung der  
Mikrolinsen 7 eines Wellenfrontsensors bei der dritten  
20 Ausführungsform eines erfindungsgemässen Neigungsmessers,  
bei dem Strahlungsquelle, Linse und Behälter mit dem Medium  
in der Darstellung weggelassen wurden. Die Strahlung wird  
hierbei über die flächig angeordneten Mikrolinsen 7 auf die  
Kamera 8''' des Detektors abgebildet.

25

Eine mögliche Form des erfindungsgemässen Verfahrens wird  
in Fig.8 schematisch erläutert. Bei einem Detektoraufbau  
nach dem in Fig.4 erläuterten Prinzip mit Wellenfrontsensor  
werden die einzelnen Pixel der Kamera 8 nur dann in die  
30 Auswertung einbezogen, wenn der Fokuspunkt FP1 mit der  
optischen Achse OA der jeweiligen Mikrolinse 7  
zusammenfällt oder deren Abweichung voneinander innerhalb  
einer vorgegebenen Toleranz liegt. Zur Auswertung werden

dann nur die Pixel ausgelesen oder weiterverarbeitet, die dieser Bedingung genügen, so dass nur der Teil des Bildes verwendet wird, der ohne Aberration aufgenommen werden kann. Dabei ist es möglich auch verschiedene Pixel  
5 miteinander zu korrelieren, insbesondere können Pixel zu grösseren Überstrukturen zusammengefasst werden. Auch kann auf das so gewonnen Bild an sich bekannte Verfahren der Bildverarbeitung angewendet werden, um eine Verbesserung der optischen Parameter zu erhalten.

10 Fig.9 zeigt schematisch eine Ausführungsform des erfindungsgemässen Wellenfrontsensors. Vor den Mikrolinsen 7 ist ein diffraktives Element 14 angeordnet, durch das die von der Wellenfront WF4 kommende Strahlung gebeugt wird.  
15 Dieses diffraktive Element kann beispielsweise ein Hologramm, ein Gitter, insbesondere ein Dammann-Gitter, oder eine andere gradientenoptische Struktur sein. Neben der direkten Positionierung über den Mikrolinsen 7 kann auch eine Anbringung an anderer Stelle im Strahlengang, z.B.  
20 auf einem der Umlenkspiegel der Fig.6 oder in unmittelbarer Nähe des Mediums, z.B. auf einem Glas des Behälters, erfolgen. Durch die Beugungswirkung entstehen auf der Kamera 8 anstelle oder neben dem ungestörten Fokalkpunkt FP2 mehrere Intensitäts-Strukturen 15, die miteinander  
25 korreliert sind. Je nach Auslegung des diffraktiven Elements 14 und der Gestalt der Wellenfront WF4 können diese Strukturen auch in Bereichen abgebildet werden, die bei einem Wellenfrontsensor ohne diffraktives Element 14 jeweils ausschliesslich einer anderen Subapertur zugeordnet  
30 wären. Neben den höheren Beugungsordnungen können diese Strukturen beispielsweise auch ausgedehnte Fourierbilder des diffraktiven Elementes sein. Hierdurch wird es möglich, für jede Subapertur einen grösseren Bereich der Kamera 8

zur Detektion zu verwenden und so eine höhere Auflösung, grössere detektierbare Winkelbereiche und/oder einen hohen Dynamik-Bereich zu erreichen.

- 5 Die dargestellten Ausführungsformen stellen nur Beispiele für erfindungsgemässe Realisierungen dar und sind daher nicht abschliessend und einschränkend zu verstehen. Darüber hinaus kann der Fachmann weitere erfindungsgemässe Ausführungsformen, z.B. unter Verwendung anderer
- 10 Strahlgänge oder Umlenkelemente, wie beispielsweise Prismen, streuender Flächen oder Lichtleitern, oder alternativer Formen des Detektors und des Wellenfrontsensors ableiten.
- 15 In den Figuren sind die Linsen des Wellenfrontsensors und insbesondere deren Zahl und Grösse rein schematisch dargestellt. In den realen Ausführungsformen ist die Zahl der Linsen meist höher, so dass höhere Auflösungen der Lage bzw. Winkel erzielbar sind.

## Patentansprüche

### 1. Optischer Neigungsmesser mit

- 5           • einer Strahlungsquelle (11,11',11'') zur Erzeugung von Strahlung (S), insbesondere einem Halbleiterlaser oder einer LED;
- 10           • einem Medium (6,6'), dessen optische Grenzfläche neigungsabhängig ist;
- 15           • einem Detektor (3',3'',3'''), vorzugsweise mit einer CMOS- oder CCD-Mikro-Kamera, zum Aufnehmen und Umwandeln einer Abbildung in Signale; und
- einer Auswerteeinheit (9',9'',9''') zur Bestimmung der Neigung;

20           wobei Strahlungsquelle (11,11',11'') und Detektor (3',3'',3''') so angeordnet sind, daß die Wellenfront (WF2, WF3, WF4) vermittelt zumindest eines Teils des Mediums (6,6') mittelbar oder unmittelbar, in Reflexion und/oder Transmission auf den Detektor abgebildet (3',3'',3''') wird;

25

**dadurch gekennzeichnet, daß**

der Detektor (3',3'',3''') einen Wellenfrontsensor aufweist oder der Detektor (3',3'',3''') als Wellenfrontsensor

30           ausgebildet ist.

### 2. Optischer Neigungsmesser nach Anspruch 1,

**dadurch gekennzeichnet, daß**

das Medium (6,6') eine neigungsempfindliche Oberfläche aufweist, insbesondere eine Flüssigkeit, ist.

5 3. Optischer Neigungsmesser nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet, daß

10 Strahlungsquelle (11,11',11''), Medium (6,6') und Detektor (3',3'',3''') so angeordnet sind, daß die Strahlung (S) bei einem Durchgang durch das Medium (6,6') im wesentlichen senkrecht zu wenigstens einer Oberfläche des Mediums (6,6') geführt wird.

15 4. Optischer Neigungsmesser nach einem der vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, daß

20 der Detektor (3',3'',3''') wenigstens ein diffraktives Element (14) aufweist, wobei das auf einem Array aus Mikrolinsen (7) angeordnet ist.

25 5. Optischer Neigungsmesser nach einem der vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, daß

30 der Detektor (3',3'',3''') als Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor ausgebildet ist oder einen Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor aufweist.

6. Optischer Neigungsmesser nach einem der vorangehenden Ansprüche,

**dadurch gekennzeichnet, daß**

der Detektor (3',3'',3''') mittelbar oder unmittelbar auf einem das Medium (6,6') enthaltenden Behälter angebracht ist.

5

7. Optischer Neigungsmesser nach einem der vorangehenden Ansprüche,

**dadurch gekennzeichnet, daß**

10

der Detektor (3',3'',3''') eine zweidimensional auflösende Detektorfläche aufweist, insbesondere mit einer zu einer Oberfläche des Mediums (6,6') parallelen Orientierung der Detektorfläche.

15

8. Optischer Neigungsmesser nach einem der vorangehenden Ansprüche,

**dadurch gekennzeichnet, daß**

20

Strahlungsquelle (11,11',11'') und Detektor (3',3'',3''') auf einer gemeinsamen Basis (12,12'), vorzugsweise einer Leiterplatte, angeordnet sind.

25

9. Optischer Neigungsmesser nach Anspruch 8,

**dadurch gekennzeichnet, daß**

30

Strahlungsquelle (11,11',11'') und Detektor (3',3'',3''') so angeordnet sind, dass die erzeugte Strahlung (S) senkrecht zur Oberfläche der Basis (12,12') emittiert wird und die Empfangsrichtung des Detektors (3',3'',3''') senkrecht zur Oberfläche der Basis (12,12') orientiert ist.



10. Optischer Neigungsmesser nach einem der vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, daß

5

im Strahlengang von der Strahlungsquelle (11,11',11'') zum Detektor (3',3'',3''') wenigstens ein Umlenkelement (13',13'') angeordnet ist.

10 11. Optischer Neigungsmesser nach einem der vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, daß

15 im Strahlengang von der Strahlungsquelle (11,11',11'') zum Detektor (3',3'',3''') wenigstens ein diffraktives und/oder gradientenoptisches Element (10), insbesondere eine Fresnel-Linse, angeordnet ist.

20 12. Geodätisches Gerät, insbesondere Entfernungsmesser oder Lotstock, mit einem Neigungsmesser nach einem der Ansprüche 1 bis 11.

13. Verfahren zur Messung der Neigung eines Gerätes,  
25 insbesondere eines geodätischen Gerätes, mit

- einer Strahlungsquelle (11,11',11'') zur Erzeugung von Strahlung (S), insbesondere einem Halbleiterlaser oder einer LED;

30

- einem Medium (6,6'), dessen optische Grenzfläche neigungsabhängig ist;

- einem Detektor (3',3'',3'''), vorzugsweise mit einer CMOS- oder CCD-Mikro-Kamera, zum Aufnehmen und Umwandeln einer Abbildung in Signale; und

- 5
- einer Auswerteeinheit (9',9'',9''') zur Bestimmung der Neigung;

10 wobei Strahlungsquelle (11,11',11'') und Detektor (3',3'',3''') so angeordnet sind, daß die Wellenfront (WF2, WF3, WF4) vermittelt zumindest eines Teils des Mediums (6,6') mittelbar oder unmittelbar, in Reflexion und/oder Transmission auf den Detektor (3',3'',3''') abgebildet wird;

15 mit den Schritten

- Abbilden der Wellenfront (WF2, WF3, WF4) auf den Detektor(3',3'',3'''),
- 20 - Aufnehmen der Signale des Detektors (3',3'',3'''),
- Auswerten der Signale und Bestimmen der Neigung des Gerätes durch die Auswerteeinheit (9',9'',9'''),

25 dadurch gekennzeichnet, dass

beim Auswerten der Signale Informationen über die Wellenfront (WF2,WF3,WF4), insbesondere die Formfunktion der Wellenfront (WF2,WF3,WF4), abgeleitet werden.

30

14. Verfahren nach Anspruch 13,

dadurch gekennzeichnet, dass

beim Auswerten der Signale eine Analyse der Abweichung der Wellenfront (WF2,WF3,WF4) von der Wellenfront (WF1) vor einer Wechselwirkung mit dem Medium erfolgt.

5 15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

10 beim Aufnehmen der Signale und/oder beim Auswerten der Signale eine Rekonstruktion der Wellenfront (WF1) vor einer Wechselwirkung mit dem Medium (6,6') erfolgt.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15,

15 **dadurch gekennzeichnet, dass**

beim Aufnehmen der Signale und/oder beim Auswerten der Signale eine Auswahl einzelner Bildpunkte des Detektors (3',3'',3''') erfolgt, wobei vorzugsweise nur diese Bildpunkte  
20 zum Bestimmen der Neigung des Gerätes verwendet werden.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 16,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

25

beim Auswerten der Signale eine Ableitung der Formfunktion mittels eines Polynom-Ansatzes erfolgt, insbesondere unter Verwendung von Zernike-Polynomen.

30 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 17,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

35 beim Aufnehmen der Signale und/oder beim Auswerten der Signale verschiedene Aperturen miteinander korreliert werden.

19. Verwendung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 13  
bis 18 zur Kompensation von Vibrationen und/oder statistischer  
Fluktuationen wenigstens einer Oberfläche des Mediums (6,6'),  
5 insbesondere aufgrund von Konvektionsprozessen.

20. Wellenfrontsensor zur Verwendung in einem optischen  
Neigungsmesser nach einem der Ansprüche 1 bis 12, mit

- 10
- einer Kamera (8), vorzugsweise mit einer CMOS- oder  
CCD-Mikro-Kamera, zum Aufnehmen und Umwandeln einer  
Abbildung in Signale; und
  - einem Array aus Mikrolinsen (7)
- 15

dadurch gekennzeichnet, dass

dem Array aus Mikrolinsen (7) wenigstens ein diffraktives  
Element (14) zugeordnet ist.

20

21. Wellenfrontsensor nach Anspruch 20,

dadurch gekennzeichnet, dass

25 das diffraktive Element (14) ein Hologramm oder ein Gitter,  
insbesondere ein Dammann-Gitter, ist.

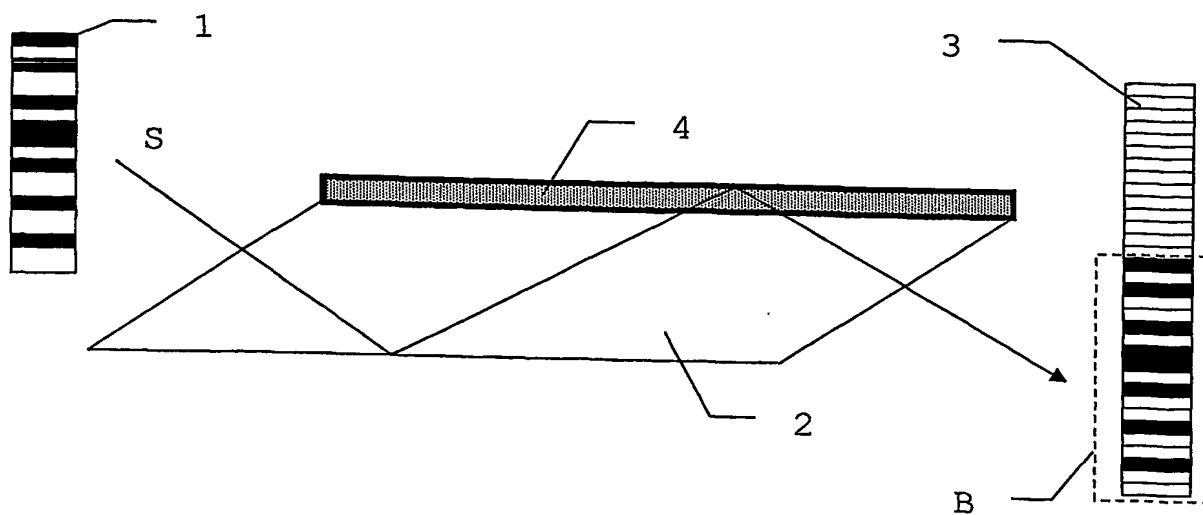


Fig. 1a

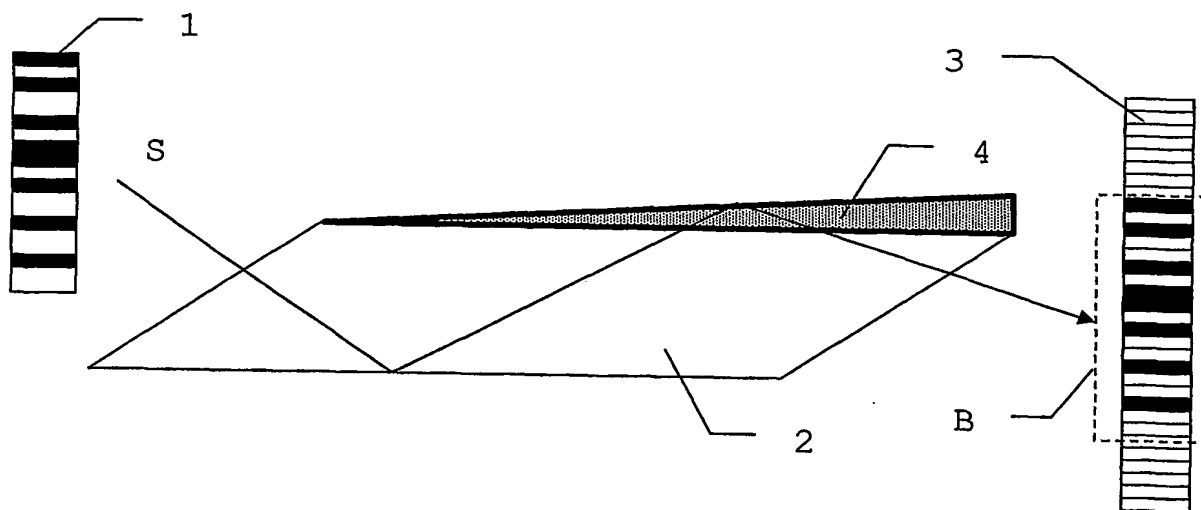


Fig. 1b

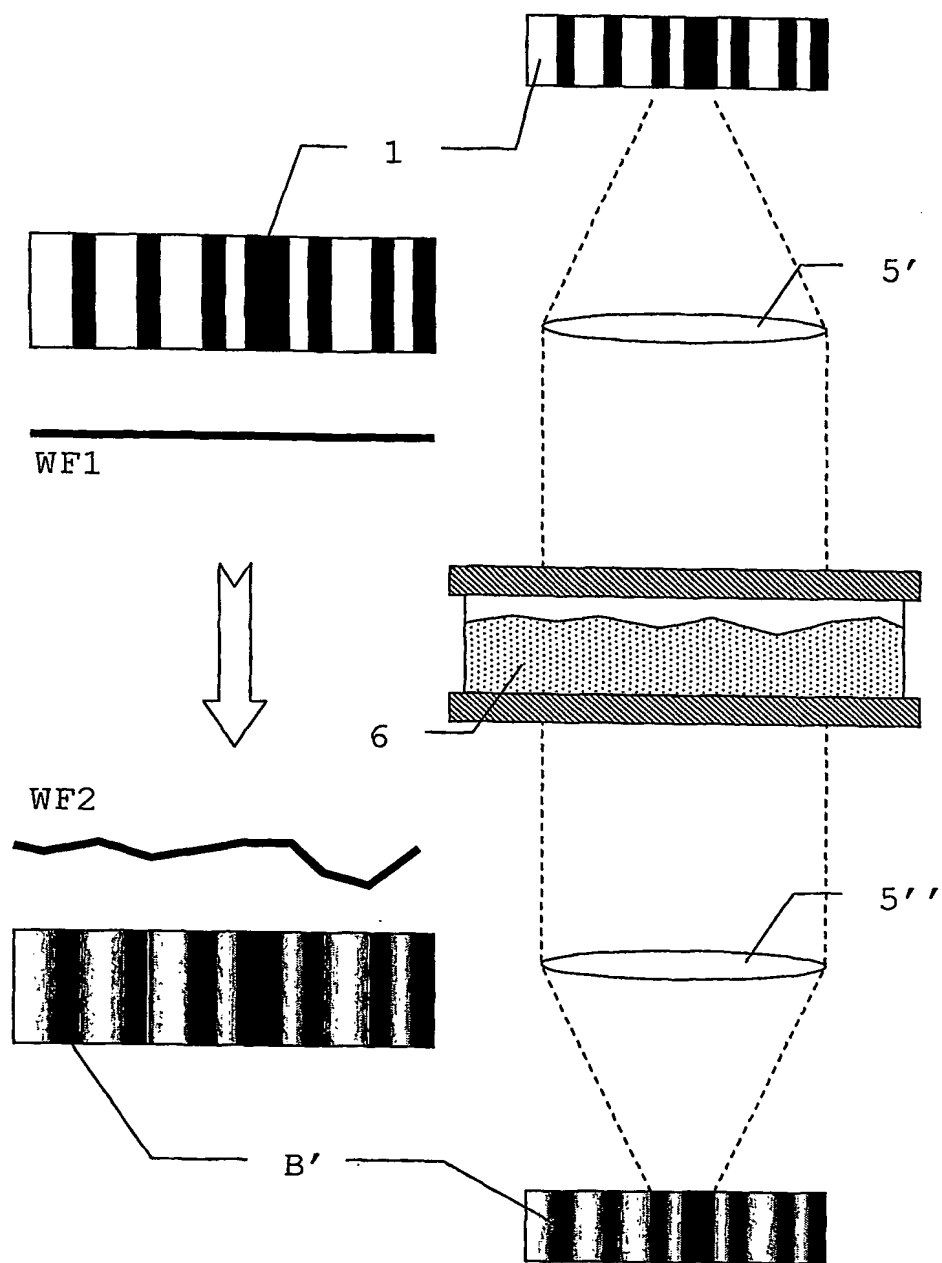


Fig. 2

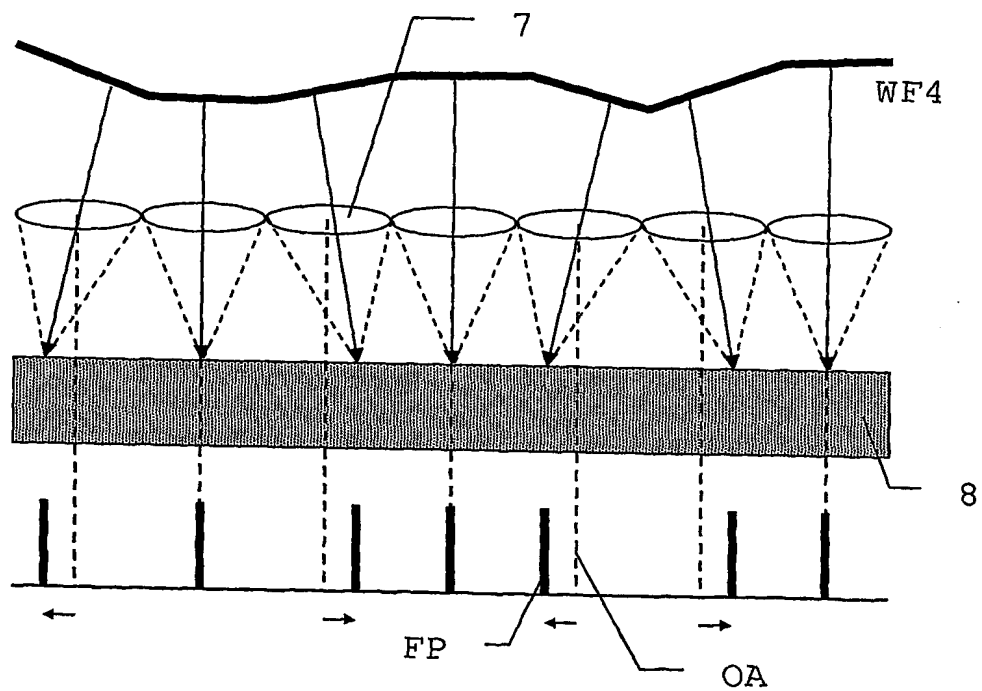
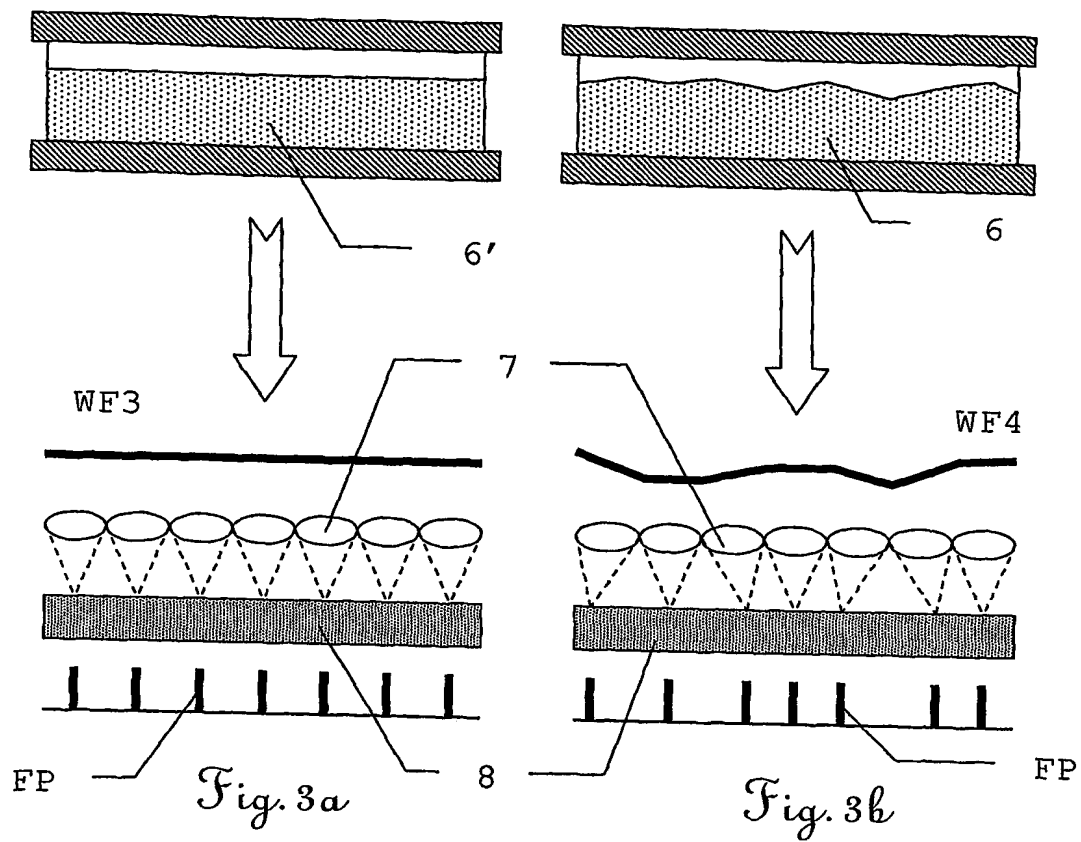


Fig. 4

